

流動シミュレーションを用いたPVC高速押出成形用ダイ設計

High-Speed Extrusion Die Design by Using Flow Simulation

劔持 慎也* ・ 齋藤 一永** ・ 竹越 雅美** ・ 加藤 寛満** ・ 増川 功一*
Shinya Kenmochi Kazuhisa Saito Masami Takekoshi Hiromitsu Kato Koichi Masukawa

高速押出成形用ダイ設計において、レオロジーモデルの近似手段を用いてダイ内溶融樹脂の流動解析を行うことにより、最適なダイ形状を設計するシミュレーション技術を開発した。ダイ内での溶融樹脂の非ニュートン流動を代表的な剪断速度分布とそれに合致した領域のPVC粘度特性の実験的な把握から、Power-lawモデルでの近似が最適であることを見いだした。さらに、非等温非ニュートン3D流動解析によってダイ出口での速度分布を均一にすることで、所定の製品形状を得るダイ構造を決定した。これにより、従来よりも高速な成形条件でも同一の品質を得られる押出成形を実現している。

In the design process of a high-speed extrusion die, a simulation technology for designing an optimized die opening shape has been developed based on a flow analysis of molten resin in the die by approximating through the use of a rheology model. It was found that the non-Newtonian flow of the molten resin in a die was best approximated by using a Power-law model from a typical shear velocity distribution and the experimental knowledge of the viscosity characteristics of PVC in the corresponding region. In addition, a die structure for obtaining the required product shape has been determined by unifying the velocity distribution at the die exit based on a non-isothermal non-Newtonian 3D flow analysis. The use of this die structure enables extrusion of the same quality product at a higher forming speed than that required in the previous process.

1. ま え が き

近年、成形加工分野では高付加価値成形品の開発、成形材料の多様化および環境問題への対応、多品種少量生産における在庫削減、生産拠点のグローバル化、さらには成形熟練者の後継者育成（2007年問題）などさまざまな技術課題の解決が急務とされている。このような状況のなか、製品開発や生産サイクルのスピードアップ、成形品精度の向上、コストダウンの実現などのため、これまでの経験重視型の成形技術に加えて、CAEの活用に対する期待が一層高まってきている。

そこで当社製品であるエアコン配管用化粧カバー「スッキリダクト」（図1）を事例としてCAEの適用による製品開発期間の短縮などの検討を行った。

「スッキリダクト」は塩化ビニル樹脂（以下、PVCと記す）製の異形押出成形品であり、生産性向上のため高速成形による生産が求められている。しかし、現状のダイを用いて高速で押し出した場合、ダイの流路バランスが崩れる

ためダイ出口の流速分布が不均一となり良品が得られない、という問題がある。



図1 「スッキリダクト」製品外観

そこで、押出成形CAEによりダイ内およびダイ出口の流速分布を予測し、高速押出成形ダイの設計に適用することで高速成形を実現したので、その内容について述べる。

* 生産技術研究所 Production Technologies Research Laboratory

** 情報機器事業本部 配管機材事業部 Electrical Conduits and Wiring Materials Division, Information Equipment & Wiring Products Manufacturing Business Unit

2. 解析環境

ソルバは、有限要素熱流動解析プログラム SUNDYTETRA ((株) プラメディア) を使用した。

SUNDYTETRA は、3次元定常非圧縮性流体の運動量方程式 (1)、連続方程式 (2)、エネルギー方程式 (3) ならびに非ニュートン純粘性構成方程式からなる支配方程式 (4) で構成され、熱流動現象を定量化する¹⁾。

$$\nabla \cdot \tau = \nabla p \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q \quad (3)$$

$$\tau = 2\eta \mathbf{D} \quad (4)$$

ここで、 τ ：応力テンソル、 p ：圧力、 $\mathbf{v}$ ：流速ベクトル、 ρ ：密度、 C_p ：比熱、 T ：温度、 K ：熱伝導率、 Q ：粘性発熱量、 η ：粘度、 $\mathbf{D}$ ：変形速度テンソルを示す。

また、壁面のすべりは考慮しないものとする。

3. 非ニュートン流体の取扱い

「スッキリダクト」に使用されている PVC などの樹脂の溶融時は高分子流体であり非ニュートン流体に分類される²⁾。

ニュートン流体の粘度は剪断速度に依存しないが、非ニュートン流体は剪断速度と応力の関係が非線形性を示し、剪断速度に依存する (図2)。

非ニュートン流体は、剪断速度の増加に伴い粘度が低下する shear-thinning 性を示す。剪断速度が小さくなると粘度は一定となり (領域A)、また、剪断速度が大きくなっても粘度は一定となる (領域B)。このように、低剪断速度領域と高剪断速度領域でニュートン粘性を示すため、前者を第一ニュートン領域、後者を第二ニュートン領域と呼んでいる。

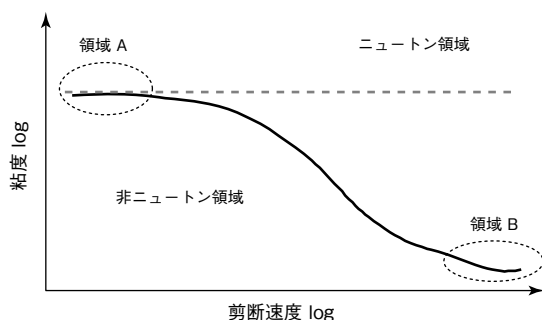


図2 粘度の剪断速度依存性の模式図

図3に「スッキリダクト」に使用している PVC の粘度と剪断速度の関係を示す。また、比較材料としてポリカー

ボネート (PC) を併せて示した。なお、PVC の粘度は剪断速度 1 s^{-1} 以下では回転型レオメータ (Bohlin Gemini HR nano, Malvern 社製) を、剪断速度 1 s^{-1} 以上ではキャピラリーレオメータ (RH2000, Rosand 社製) を用いて 190°C 、 195°C 、 200°C で測定した。

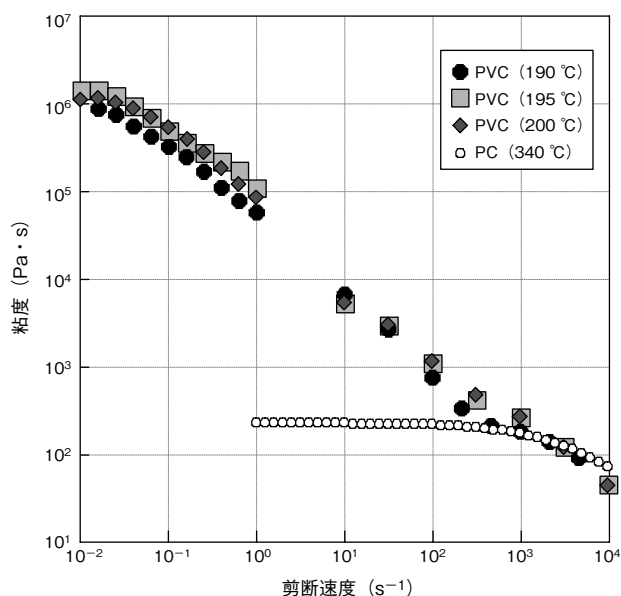


図3 PVC粘度の剪断速度依存性

図3から、PVCは剪断速度が増加するに伴い、shear-thinning性を示す典型的な非ニュートン流体であり、PCの粘度特性と比較してもPVCがshear-thinning性が強い非線形性を示す材料であることがわかる。

この非線形性を示す流動曲線を近似するモデルとして、

SUNDYTETRAで対応している近似モデルPower-lawモデル (5) とCross-Arrheniusモデル (6) を用いてPVCの粘度の剪断速度依存性を近似式化した (図4)。

$$\eta = C_1 \cdot \dot{\gamma}^{C_2} \cdot \exp(C_3 \cdot T) \quad (5)$$

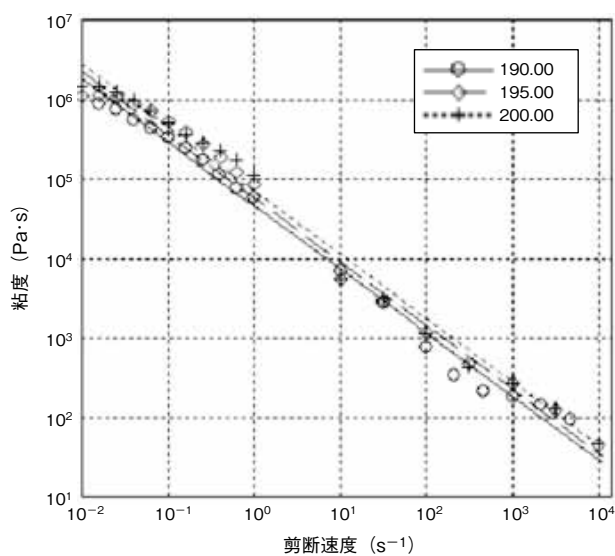
$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + C_1 \cdot (\eta_0 \cdot \dot{\gamma})^{C_2}} \quad (6)$$

$$\eta_0 = C_3 \cdot \exp\left(\frac{C_4}{T + 273.15}\right)$$

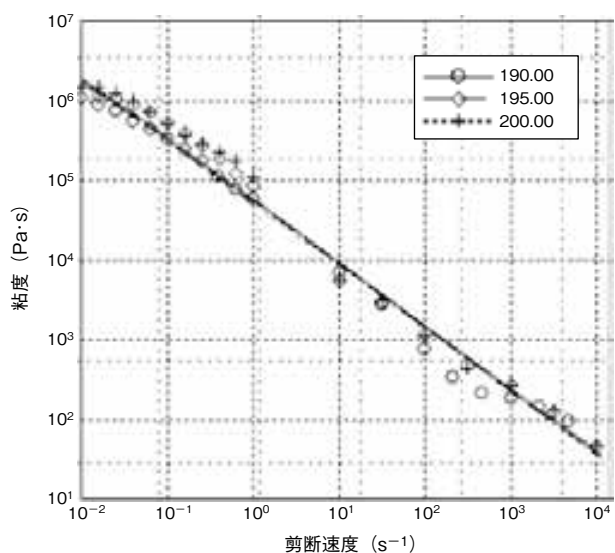
C_n ：計算により算出される係数

$\dot{\gamma}$ ：剪断速度

図4から、おのおのの近似モデルにおいて非ニュートン流体が示す粘度の非線形性を打ち消すように近似されるため、剪断速度により変化する粘度特性を近似することができない。そこで、実際に「スッキリダクト」のダイ流路における剪断速度領域を把握することで、近似する剪断速度領域を絞り込み、非線形な粘度特性に対する近似を容易に



(a) Power-lawモデル



(b) Cross-Arrheniusモデル

図4 近似式による粘度の剪断速度依存性

するためにシミュレーションを実施し、結果を図5に示す。

なお、図5に示す剪断速度の測定箇所は、ダイ流路内において高剪断速度領域を示した出口付近の任意の流路断面である。図5から、今回対象としているダイ流路形状および成形条件における剪断速度領域は、 500 s^{-1} 以下の範囲であることがわかる。これより 500 s^{-1} 以下の剪断速度領域を対象に再近似を行う（図6）。

図6から、Power-lawモデルにおいては低剪断領域になるに従って近似式との乖離が大きくなるが、Cross-Arrheniusモデルはすべての剪断速度領域において精度良く近似されていることがわかる。

しかし、計算収束性を考慮するとPower-lawモデルで近似したほうが望ましいので、粘度近似式が解析結果に及ぼす影響について検討を行う。

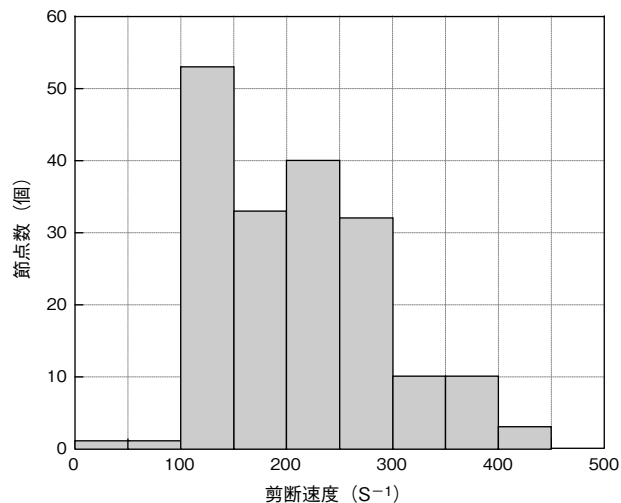
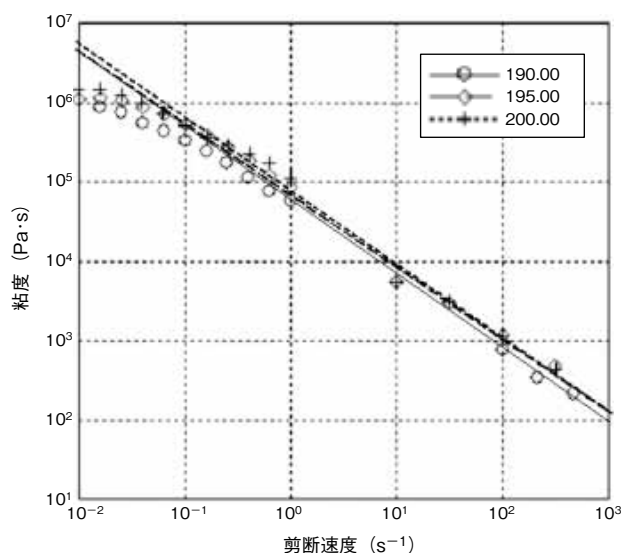
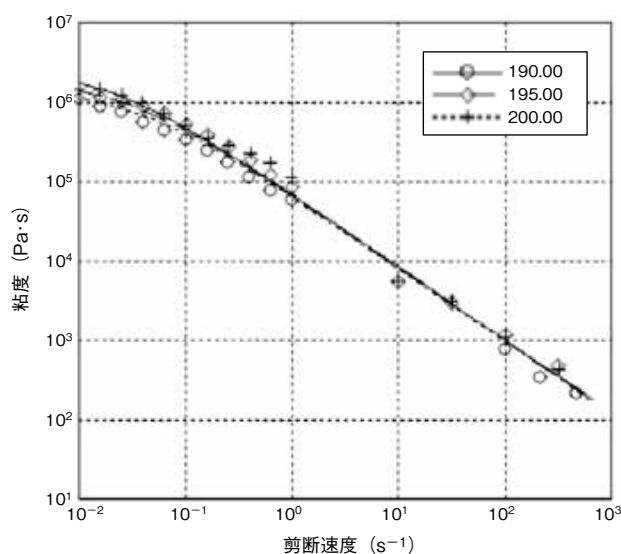


図5 「スッキリダクト」用ダイの剪断速度分布



(a) Power-lawモデル



(b) Cross-Arrheniusモデル

図6 近似式による粘度の速度依存性

4. 粘度近似式が解析結果に及ぼす影響

粘度近似式が解析結果に及ぼす影響について、図7に示す $100 \times 50 \times t15$ mmのスリット状のメッシュモデルで検討を行い、そのメッシュ分割寸法比は1:5:1としている。

図6から粘度の値は低剪断速度領域に近づくに伴い近似式との差が大となることから、流速をパラメータとして、解析により計算される剪断速度を 1 s^{-1} 以下、 500 s^{-1} 以下に変化させることで検討を行い、図8にそれらの出口流速分布の結果を示す。

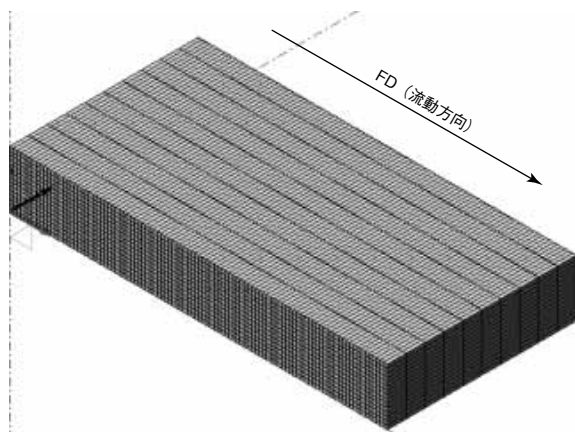


図7 検証用スリットメッシュモデル

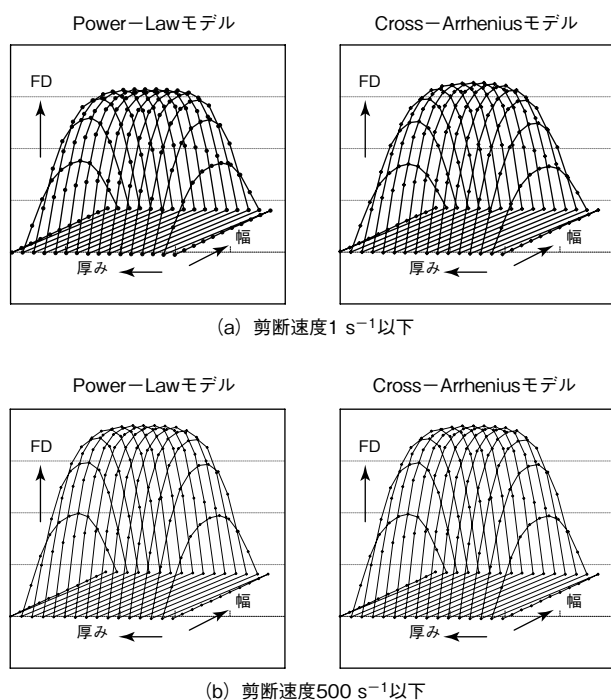


図8 異なる剪断速度領域におけるメッシュモデル出口の流速分布

剪断速度 1 s^{-1} 以下（図8 (a)）の領域においては粘度近似式による影響が現れていることが確認されるが、剪断速

度 500 s^{-1} 以下（図8 (b)）においては粘度近似式の違いによる影響はみられないことがわかる。

したがって、図5からダイ出口付近の剪断速度の大半が 100 s^{-1} 以上を占める今回の流路モデルにおいては、Power-law モデルで近似しても問題がないことがわかる。

5. ダイ流路への適応

図9にPower-law モデルにより近似した粘度モデルを用いた「スッキリダクト」のダイ出口断面の流速分布の解析結果を目標速度で除したものを示す (V_0 : 目標速度, V : 解析結果から得た速度)。初期設計時のダイ流路形状に流動シミュレーションを実施し（図9 (a)），その結果から修正設計した形状のシミュレーションを繰り返すことによって精度の良い流動状態の予測が可能となり（図9 (b)），金型の立上げ前の設計精度向上を実現している（表1）。

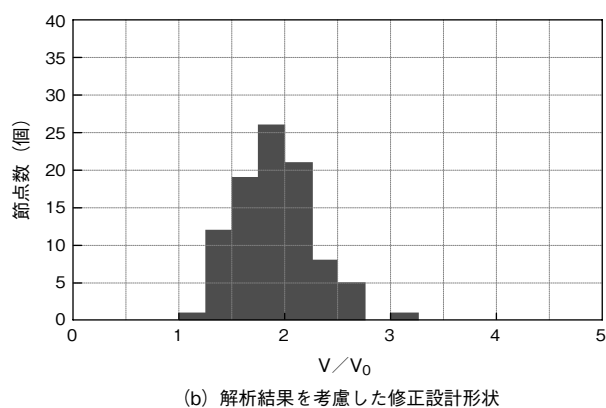
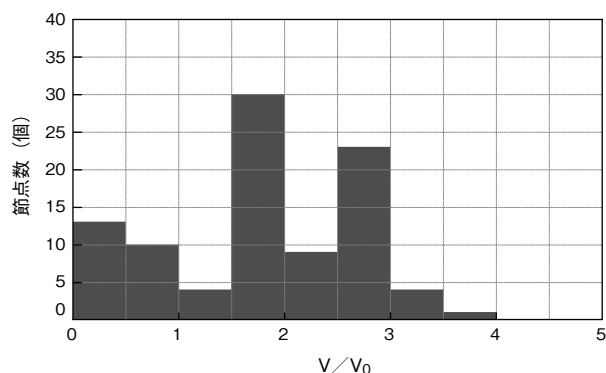


図9 ダイ出口断面の流速分布

表1 CAE導入前後のダイ修正回数

	金型修正回数 (回)
CAE導入前	5
CAE導入後	3

6. あ と が き

高速押出成形用ダイ設計において、レオロジーモデルの近似手段を用いてダイ内溶融樹脂の流動解析を行うことにより、最適なダイ形状を設計するシミュレーション技術を開発した。ダイ内での溶融樹脂の非ニュートン流動を代表的な剪断速度分布とそれに合致した領域のPVC粘度特性の実験的な把握から、Power-lawモデルでの近似が最適であることを見いだした。さらに、非等温非ニュートン3D流動解析によってダイ出口での速度分布を均一にすることで、所定の製品形状を得るダイ構造を決定した。これにより、従来よりも高速な成形条件でも同一の品質を得られる押出成形を実現している。

粘度データの近似手法を適切にすることはシミュレーションの精度を上げるためには大変重要な因子の一つである。

しかし、たとえ精度の良い近似手法を用いたとしても、解析結果と実際の結果との差は現実には存在する。その差をより小さくするためには、メッシュの影響、現時点では仮定している粘弾性の取扱い、壁面のすべり、伸長粘度などを考慮したソルバを検討していくことも重要であると思われる。またそれ以上に、粘度データや、その他の材料パラメータを高精度で測定すること、解析結果と実際の成形結果を比較するための実験を精度良く行うことが必須であると考ええる。

つまり、これらを十分考慮したうえで、解析を用いることは、金型設計、修正の判断指標として活用するうえで大変有用であり、それらの結果の積上げもまた必要である。それらがノウハウとなり、独自の技術確立へとつながっていくと考えられるためである。そして今後、このシミュレーション技術を金型設計、修正の判断指標として他の押出成形品へ活用することで、金型開発期間や製作費用の削減が期待される。

*参考文献

- 1) 谷藤 眞一郎：スパイラルマンドレルダイの3次元熱流動解析，「成形加工」第16巻，第1号，p. 37-41（2004）
- 2) 中村 喜代次：非ニュートン流体力学，コロナ社，p. 56-71

◆執筆者紹介



劔持 慎也
生産技術研究所



齋藤 一永
配管機材事業部



竹越 雅美
配管機材事業部



加藤 寛満
配管機材事業部



増川 功一
生産技術研究所